HYDROAKUSTISCHE MESSUNGEN IN EINEM SCHALLWEICH BEGRENZTEN HALLTANK

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Thomas Wetterling
aus Freiburg im Breisgau

Göttingen 1975

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534917_0028

HYDROAKUSTISCHE MESSUNGEN IN EINEM SCHALLWEICH BEGRENZTEN HALLTANK

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Thomas Wetterling
aus Freiburg im Breisgau

Göttingen 1975

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

D 7

Referent : Prof. Dr. M. R. Schroeder

Korreferent : Prof. Dr. H.-U. Harten

Tag der mündlichen Prüfung : 2. Juli 1975

Zusammenfassung

Es wird ein schallweich begrenzter Hallraum für Wasserschall beschrieben, in dem der Einfluß der statistischen Eigenschaften des Schallfeldes auf Schwankungen bei der Nachhallzeitmessung untersucht werden. Eine genaue Bestimmung der Nachhallzeit ist für Absorptionsgradmessungen notwendig. Ausreichende Genauigkeit läßt sich nur durch die Mittelung über viele voneinander unabhängige Messungen erreichen. Durch Verändern der Wandlerpositionen oder geringe Änderungen des Volumens können voneinander unabhängige Messungen durchgeführt werden. Die Wiederholung bei unveränderter Meßanordnung ist dagegen auch bei stochastischen Anregungssignalen redundant und reicht nicht aus. Bei der Bestimmung der von einem Wandler abgestrahlten akustischen Gesamtleistung muß ebenfalls über unabhängige Messungen gemittelt werden. Es wird über Schalleistungsmessungen mit einem reversiblen Hydrophon und einer schwingenden Stahlplatte als Schallquellen berichtet.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung	1
2	Meßanordnung	2
3	Statistische Eigenschaften des Schallfeldes	
	3.1 Theoretische Überlegungen	5
	3.2 Meßergebnisse	9
4	Absorptionsgradmessungen	15
5	Schalleistungsmessungen	
	5.1 Schallquelle mit bekannter Leistung	18
	5.2 Schallabstrahlung einer ebenen Stahlplatte	22
6	Schluß	26
	Literatur	27
	Abbildungen	30

1 Einleitung

Die bekannten Hallraumverfahren zur Absorptionsgradmessung und zur Bestimmung der von einer Schallquelle abgestrahlten Gesamtleistung lassen sich vom Luftschall auf den Wasserschall übertragen. Mehrere Autoren berichten über Schalleistungsmessungen in Hallräumen für Wasserschall, Halltanks genannt /1-4/. Sie benutzen bei ihren Messungen Metalltanks, obwohl sich wegen der hohen Impedanz des Wassers die Randbedingung "schallhart" für die Reflexion von Wasserschall nur unvollkommen verwirklichen läßt und deshalb keine so geringe Absorption wie im Luftschall erreicht wird. Andere Autoren verwenden dünnwandige Aluminiumkessel zur Messung wässeriger Elektrolytlösungen mit einem Nachhallverfahren /5,6/. Da die Wände dieser Tanks neben dem Wasser als Energiespeicher am Nachhallvorgang beteiligt sind, ergeben sich Probleme bei der Konstruktion und Aufstellung, um die Verluste durch Körperschall möglichst niedrig zu halten.

Die Reflexion an der schallharten Grenzfläche läßt sich für einen Halltank durch die an einer "schallweichen" ersetzen. Die Grenzfläche Wasser-Luft ist für Wasserschall nahezu ideal schallweich. Aber auch Polystyrolschäume mit einem hohen Anteil an Luft reflektieren Wasserschall sehr gut. In zwei Arbeiten /7,8/ wird über einen mit diesem Material ausgekleideten, schallweichen Halltank berichtet. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die statistischen Eigenschaften des Schallfeldes in einem schallweich begrenzten Halltank zu untersuchen. Außerdem wird über Leistungsmessungen im Halltank berichtet, die für Untersuchungen zur Belastung eines schwingenden Objektes durch das umgebende Medium interessant sind /4,7,9/.

2 Meßanordnung

Sehr gut geeignet für die schallweiche Auskleidung eines Halltanks ist der Polystyrolschaum Styrofoam FR (Handelsname der Dow Chemical Company). Die gute Reflexion von Wasserschall an diesem Material läßt sich durch eine vorgelegte dünne Folie noch verbessern, die selbst kaum absorbiert, aber die als Strömungsabsorber wirkenden Poren in der Schaumoberfläche wasserfrei hält und damit unwirksam macht /8/.

Auf das tragende Gerüst des Halltanks, Holzplatten, die von einem geschweißten Stahlrahmen gehalten werden, sind vollflächig 40 mm starke und 500 mm breite Styrofoam FR - Platten als schallweiche Begrenzung aufgeklebt. Vor diese Auskleidung wird ein genau passend geschweißter Sack aus einer Polyäthylenfolie Suprathen 150 (Handelsname der Kalle AG) in den Tank gehängt. Diese Folie (0,15 mm stark) ist erheblich unempfindlicher als die ursprünglich untersuchte 0,1 mm starke Suprathen 100, ohne jedoch wesentlich stärker zu absorbieren. Allerdings muß auch bei der stärkeren Folie sorgfältig auf einwandfreie Beschaffenheit geachtet werden, da bereits geringe Mengen von Wasser, die durch kleine Löcher im Sack zwischen Folie und Auskleidung gelangen, die Absorption deutlich erhöhen.

Es hat sich als notwendig erwiesen, die Schweißnähte, an deren Rändern häufig winzige Lecks enstehen, mit einer dauerplastischen Dichtungsmasse abzudichten, z.B. Terostat II (Handelsname der Teroson - Werke) oder Gedilon (Handelsname der Gedurit - Chemie). Obwohl solches dauerplastisches Material bekanntlich hohe akustische Verluste hat, erhöhen diese Klebenähte die Absorption nicht merklich.

Größere Mengen Wasser, die durch Lecks oder Beschädigungen der Folie aus dem Sack austreten, können durch die Fugen zwischen den Platten und Löcher im Boden des Tanks ausfließen,

ohne die Auskleidung durch den Auftrieb des Schaums loszureißen und damit den Tank zu zerstören.

Der Tank hat die übliche schiefwinklige Form von Hallräumen. Die schallweiche Auskleidung hat eine Fläche von 8.7 m^2, die freie Wasseroberfläche ist 2.3 m^2 groß. Der Tank ist mit 2.4 m^3 enthärtetem und entgastem Wasser gefüllt, um Kalkausscheidung und die Absorption durch Gasbläschen zu vermeiden.

Die Konstruktion des Halltanks und die Meßanordnung zur Bestimmung der Nachhallzeit T sind in Figur 1 schematisch dargestellt.

Da es nicht möglich ist, den Tank durch einen kurzen Impuls ausreichender Stärke anzuregen und dann nach der Methode der integrierten Impulsantwort /10/ das exakt reproduzierbare Scharmittel aller bei dieser Meßanordnung möglichen Nachhallkurven zu bestimmen, wurde folgende Anordnung zur schnellen Messung vieler Nachhallzeiten gewählt. Der Tank wird durch Terzband-gefiltertes, gepulstes Rauschen im Frequenzbereich von 4.5 kHz bis 200 kHz angeregt. Als Sendewandler dient eine piezoelektrische Keramik (75 mm Durchmesser, 10 mm dick) in einer Ecke des Tanks. Weil der Schalldruck an der schallweichen Auskleidung verschwindet, ist der Wandabstand des Wandlers halb so groß wie die größte vorkommende Wellenlänge. Das Empfangssignal des Hydrophons - LC 5 (Celesco, früher Atlantic Research Company) oder ein Bariumtitanat - Röhrchen (12 mm lang, 4 mm Durchmesser) - wird verstärkt und gefiltert. Durch einen logarithmischen Verstärker und Gleichrichter wird die Umhüllende des Hydrophonsignals, die Nachhallkurve, gebildet. Hierzu dient ein Pegelschreiber (Brüel + Kjaer, Typ 2305) mit logarithmischem Eingangspotentiometer und ein Zusatzgerät (Brüel + Kjaer ZR 0021), das eine der Schreibstiftstellung proportionale Gleichspannung liefert. Diese Gleichspannung steuert zwei pegelabhängige Trigger, die einen Puls erzeugen, dessen Länge genau der Abklingzeit zwischen den beiden wählbaren Pegeln

entspricht. Da die Dynamik im unteren Frequenzbereich nur etwa 30 dB beträgt, sind als Schaltpegel -5 dB und -20 dB gewählt. Die Länge des Schaltpulses entspricht also der Zeit, in der der Pegel um 15 dB abfällt, einem Viertel der Nachhallzeit. Ein Zähler mißt die Länge dieses Pulses. Dieses bereits in digitalisierter Form vorliegende Meßergebnis wird über ein Zusatzgerät von einem digitalen Bandgerät auf Magnetband gespeichert und auf einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage ausgewertet.

Interessiert bei einer Meßreihe nur der Mittelwert vieler Einzelmessungen der Nachhallzeit, wird folgende Modifikation der elektronischen Apparatur benutzt. Der Puls öffnet für ein Viertel der Nachhallzeit ein Tor, so daß der Zähler in dieser Zeit die Impulse eines Frequenznormals zählt. Durch Aufsummierung ergibt sich der Mittelwert über viele aufeinanderfolgende Einzelmessungen, den ein nachfolgender Drucker festhält.

Zusätzlich wird bei beiden Modifikationen die Nachhallkurve und der Schaltpuls zur optischen Kontrolle auf einem Zweikanalspeicheroszillographen aufgezeichnet, um fehlerhafte Messungen zu erkennen und auszuschließen.

In Figur 2 ist über der Frequenz f die Nachhallzeit T für verschiedene Meßanordnungen dargestellt. Es ist deutlich die Verbesserung gegenüber dem Aufbau nach /7/, die Absorptionsverminderung durch das Entgasen des Wassers und die Absorptionserhöhung durch die stärkere Folie zu erkennen. Mit einem Absorptionsgrad $\alpha \approx 0.02$ ist der Tank mit dem beschriebenen Aufbau gut für Hallraummessungen geeignet.

3 Statistische Eigenschaften des Schallfeldes

3.1 Theoretische Überlegungen

Bei allen Messungen in einem Hallraum müssen die statistischen Eigenschaften des Schallfeldes berücksichtigt werden. Ein Hallraum ist ein Resonator, der im Frequenzbereich überlappender Moden benutzt wird. Bei der üblichen Behandlung wird vorausgesetzt, daß die mittlere Halbwertsbreite der Moden Δf mindestens dreimal so groß ist wie der mittlere Abstand der Eigenfrequenzen df /11/. Die Halbwertsbreite ist der Nachhallzeit proportional:

$$\Delta f = \frac{3}{\pi \lg e \, T} = \frac{2.2}{T} \quad . \qquad (1)$$

Die Zahl N der Eigenfrequenzen eines Raumes unterhalb einer Grenzfrequenz f_g läßt sich nach folgender Formel berechnen /12/:

$$N = \frac{4 \pi f_g^3 V}{3 c^3} + \frac{\pi f_g^2 A}{4 c^2} + \frac{f_g L}{8 c} \qquad (2)$$

(V ist das Raumvolumen, A die Raumbegrenzungsfläche, L die Summe aller Kantenlängen und c die Schallgeschwindigkeit). Diese Formel wurde für Quaderräume mit schallharten Wänden hergeleitet, läßt sich aber für große Werte von N auf beliebig geformte Räume, also auch schiefwinklige Hallräume, anwenden. Der Term $\pi f_g^2 A/4c^2$ und der (meist ohnehin vernachlässigbare) Term $f_g L/8c$ liefern zur Bestimmung der Eigenfrequenzen des beschriebenen Halltanks keinen Beitrag, da sie tangentiale Moden erfassen, die wegen der Randbedingung "schallweich" nicht auftreten. Aus der so vereinfachten Gleichung (2) errechnet sich der mittlere Abstand df zweier Eigenfrequenzen im Halltank zu

$$df = \frac{c^3}{4 \pi V f^2} \quad , \qquad (3)$$

falls df $\ll$ f ist. Eine Volumenänderung um δV erzeugt nach /13/ eine mittlere Verstimmung δf der Eigenfrequenzen des Tanks um

$$\langle \delta f \rangle = - \frac{1}{3} \frac{\delta V}{V} f \quad . \qquad (4)$$

Wenn sich die Moden überlappen, wie es in einem Hallraum der Fall ist, läßt sich für eine Frequenzänderung, die absolut größer oder gleich der Hälfte der Halbwertsbreite Δf ist:

$$\delta f \geq \frac{\Delta f}{2} = \frac{1.1}{T} \qquad (5)$$

eine neue Modenkonfiguration erwarten /14/. Die entsprechende Volumenänderung ist:

$$\delta V \geq 3 \frac{V}{f} \frac{\Delta f}{2} = \frac{3.3}{f\,T} V \quad . \qquad (6)$$

Für die Terz um 4.5 kHz hat der Tank bei einer Nachhallzeit $T \approx 0.4$ s einen mittleren Absorptionsgrad $\alpha \approx 0.02$, einen üblichen Wert für Hallräume. Eine Volumenänderung um 1.5 °/oo verursacht bereits eine neue Modenkonfiguration, bei 200 kHz und $T \approx 0.4$ s bereits eine Änderung um 0.03 °/oo. Kleine Veränderungen des Volumens bzw. Frequenzverschiebungen können durch eine neue Modenkonfiguration zu Änderungen der Abklingkonstanten und damit zu Streuungen der Nachhallzeit führen. Im Wasserschall sind geringfügige Volumenänderungen leicht möglich, um voneinander unabhängige Nachhallzeitmessungen durchzuführen.

Auch durch Änderung der Wandlerpositionen um eine halbe Wellenlänge lassen sich voneinander unabhängige Messungen der Nachhallzeit durchführen. Für zwei um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernte Meßpunkte ist bei Anregung mit einer einzigen Frequenz oder sehr schmalbandigen Signalen der räumliche Kreuzkorrelationskoeffizient P der Schallenergie Null und bleibt für größere Abstände kleiner als 0.05 /15/. Für die Anregung mit Terzbandrauschen ist die Korrelation eher noch geringer. Auch bei Anregung mit Signalen endlicher Bandbreite sind Messungen an $\lambda/2$ voneinander entfernten Punkten unabhängig /14/, wobei λ die mittlere Wellenlänge ist.

Eine theoretische Abschätzung über die Streuung bei Nachhallzeitmessungen kann aus der statistischen Behandlung des Schallfeldes abgeleitet werden /14,16/. Die Standardabweichung des stationären Schalldruckpegels L ist von der Nachhallzeit T, der Bandbreite B des anregenden Signals und der Anzahl n der voneinander unabhängigen Messungen, über die gemittelt wird, abhängig:

$$\sigma_L = \frac{5.57}{\sqrt{1 + 0.238\ T\ B}\ \sqrt{n}}\ \text{dB} \qquad (7)$$

Die obige Angabe setzt nur die Interferenz einer ausreichenden Anzahl von angeregten Moden voraus und hängt nicht vom Schalldruckpegel selbst ab. Gleichung (7) gilt deshalb auch für die Schalldruckpegelschwankungen während des Abklingvorgangs, wenn die Abklingkonstanten der interferierenden Moden nahezu gleich sind. Dies ist für den beschriebenen Halltank der Fall, denn die Nachhallkurven sind gerade und hängen nicht durch. Die Nachhallzeit, genauer ein Viertel der Nachhallzeit, wird gemessen, indem die Zeit zwischen dem ersten Abfall der Nachhallkurve unter zwei bestimmte Pegel bestimmt wird. Der Pegelunterschied beträgt $\Delta L = 15$ dB. Die Unsicher-

heit σ_t der Schaltpunkte ist $\sigma_t = \sigma_L \Delta t/\Delta L$, wobei $\Delta t/\Delta L = T/60dB$ der Abfall der Nachhallkurve ist. Da T/4 von zwei Messungen abhängt, gilt $\sigma_{T/4} = \sqrt{2}\,\sigma_t$ und $\sigma_T = 4\sigma_{T/4}$ oder

$$\frac{\sigma_T}{T} = \frac{\sqrt{2}}{15}\,\sigma_L = \frac{5.57\sqrt{2}}{15\sqrt{1 + 0.238\ T\ B}\ \sqrt{n}} \quad . \qquad (8)$$

Mit der Bandbreite B=0.2316 f für eine Terz folgt

$$\frac{\sigma_T}{T} = \frac{0.525}{\sqrt{1 + 0.0551\ T\ f}\ \sqrt{n}} \approx \frac{2.23}{\sqrt{T\ f\ n}} \quad , \qquad (9)$$

wenn man die 1 unter der Wurzel vernachlässigt.

Auch ein anderer Ansatz führt zu einem ähnlichen Resultat. Für die Schwankung des Schalldruckpegels gilt nach /12/:

$$\sigma_L = 10\ \log\left(1 + \sqrt{\frac{19}{8\ \Delta N}}\right) \quad , \qquad (10)$$

wobei ΔN die Anzahl der Moden im Frequenzintervall B der Anregung sein soll. Aber nicht die Anzahl der Moden, sondern die Zahl der Maxima des Frequenzganges ist für solche Betrachtungen wichtig /16/. Wenn sich die Moden überlappen, liegen die Maxima im Mittel eine Halbwertsbreite $\Delta f = 2.2/T$ auseinander. Mit $\Delta N = B/\Delta f = 0.105 f T$ für eine Terz erhält man

$$\sigma_L = 10\ \log\left(1/\sqrt{\frac{22.6}{f\ T}}\right) \approx \frac{20.6}{f\ T} \quad . \qquad (11)$$

Mit Gleichung (8) und (11) und einem zusätzlichen Faktor $1/\sqrt{n}$, der die Mittelung über n unabhängige Messungen berücksichtigt, gilt:

$$\frac{\sigma_T}{T} \approx \frac{1.95}{\sqrt{T\ f\ n}} \quad , \qquad (12)$$

ein der Gleichung (9) entsprechendes Ergebnis.

3.1 Meßergebnisse

Die Schwankung der Nachhallzeit T, verursacht von kleinen Volumenänderungen, wird experimentell untersucht. Der Halltank wird mit statistischem terzbandgefilterten, gepulstem Rauschen angeregt. Für 25 aufeinanderfolgende Abklingvorgänge wird die Nachhallzeit in der oben beschriebenen Weise gemessen und auf Magnetband gespeichert. Dann wird das Wasservolumen stufenweise 25-mal um ein Inkrement $\Delta V = \delta V/2 = 1.65 V/fT$ verringert. Für jedes dieser 25 Volumen werden bei unveränderter Wandlerposition erneut 25 Nachhallzeiten gemessen und gespeichert. Aus diesen 650 Einzelwerten werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für jedes Einzelvolumen berechnet, nachfolgend "zeitliche Mittelung" genannt, da über unterschiedliche, unabhängige Anregungen gemittelt wird. Die Abweichung dieser Mittelwerte vom Gesamtmittelwert aller 650 Daten ist in Figur 3 in Prozent für das Terzband um 6.4 kHz dargestellt.

Auf der Abszisse ist die Anzahl N der Volumeninkremente ΔV aufgetragen. Zusätzlich ist als Einzelmessung jeweils die Abweichung des willkürlich herausgegriffenen zehnten Meßwertes für jedes Teilvolumen eingetragen (•), um die Schwankungen bei nur einer Nachhallzeitmessung zu verdeutlichen. Die Balken am rechten Rand geben die Standardabweichung der Mittelwerte bzw. der zehnten Werte an.

In einer zweiten analogen Meßreihe bleibt das Wasservolumen konstant, aber das Hydrophon wird nach jeweils 25 Einzelmessungen 25-mal um $\lambda/4$ der Mittenfrequenz der angeregten Terz verschoben. Die Position des Sendewandlers bleibt dabei unverändert. Durchgeführt werden diese Messungen, wie auch die mit der Änderung des Wasservolumens, für 6 verschiedene Terzbänder im Frequenzbereich von 6 kHz bis 102 kHz. Das akustisch wirksame Element des Empfängers LC 5 hat die Maße

3.5 mm x 2 mm, so daß die Positionsänderungen um $\lambda/4$ ($\approx$3.7 mm bei 100 kHz) nie kleiner als der Wandler werden. Dadurch wird vermieden, daß bereits der Wandler über zwei Meßpunkte mittelt. In Figur 4a sind die Ergebnisse für die Meßreihe mit Änderung der Empfängerposition analog zu der Darstellung in Figur 3 aufgetragen.

Bei einer weiteren Messung für die Terz um 6.37 kHz wurde der Sender bei unveränderter Empfängerposition verschoben. Die Ergebnisse sind in Figur 4b wiedergegeben. Da für diese Betrachtungen und Experimente Sender und Empfänger gleichwertig sind, ergeben sich ebenfalls Schwankungen der Nachhallzeit mit derselben Standardabweichung wie bei Veränderung der Empfängerposition.

In einer weiteren Serie wurde ohne jede Veränderung 650-mal die Nachhallzeit hintereinanderweg gemessen. Zum besseren Vergleich mit den Figuren 3-4 sind die Ergebnisse in Figur 5 auf dieselbe Art und Weise dargestellt, allerdings hat die Abgabe N auf der Abszisse keine physikalische Bedeutung, sondern unterteilt die Meßwerte in Gruppen zu je 25. Der jeweils zehnte Wert jeder Gruppe ist wiederum als Einzelmessung eingetragen.

Für eine Abschätzung über die Güte der Messungen sei an Gleichung (9) bzw. (12) erinnert. Bei der zuletzt beschriebenen Meßreihe wird nicht über voneinander unabhängige Messungen gemittelt, also ist n=1. Mit einer Nachhallzeit T$\approx$0.4s ergibt sich dann für die Standardabweichung im Terzband um 6.37 kHz der Wert $\sigma_T/T=2/\sqrt{0.4\times6370}=0.04$ oder 4%. Zusätzlich muß noch die Ungenauigkeit von 3% berücksichtigt werden, die von dem Pegelschreiber verursacht wird. Die Gesamtstandardabweichung ist also $(4^2+3^2)^{1/2}=5\%$, was mit den Fehlerbalken in Figur 5 recht gut übereinstimmt ($\pm$5.6%). Für die über je n=25 unabhängige Messungen gemittelten Werte sollte sich ein um $1/\sqrt{n}=1/5$ kleinerer Wert ergeben, also

1%, was genau der experimentell gefundene Wert ist.

Die Standardabweichung der gemittelten und die der Einzelmessungen unterscheiden sich bei den anderen Meßreihen nur um den Faktor 3 anstatt um 5. Daraus ist zu schließen, daß eine Mittelung über verschiedene Anregungssignale eine Mittelung über voneinander unabhängige Meßpositionen nicht ersetzen kann.

Umfassender sind die Ergebnisse in Tabelle 1 zusammengestellt. Die 650 Einzelwerte der Nachhallzeit bilden eine Matrix T_{ij}. Der Index i=1...25 gibt die 25 Wiederholungen für eine Wandleranordnung an ("zeitliche Folge"), der Index j=1...26 die Änderung der Position bzw. des Volumens ("räumliche Folge") an. In den Figuren 3-5 ist als offener Kreis jeweils der über den Index i gemittelte Wert für verschiedene j dargestellt. Die jedem einzelnen dieser Mittelwerte zuzuordnende Standardabweichung σ_T/T schwankt zwischen 3% und 10%. Ihr Mittelwert ist als Fehlerbalken angegeben. Die Mittelwerte von 8 verschiedenen Meßreihen mit Änderungen der Hydrophonposition bzw. des Volumens sind für verschiedene Arten der Mittelwertbildung in Tabelle 1 für die 6 verschiedenen Terzbänder angegeben. In Spalte 2 stehen die Werte für die Mittelung über den Index i (zeitliche Folge), in Spalte 3 die für die Mittelung über den Index j (zeitliche Folge). Die Standardabweichungen der Einzelmessungen an verschiedenen Positionen (räumliche Folge), sind größer als die der Messungen an einem Ort (zeitliche Folge), eine Bestätigung der obigen These, daß die Mittelung über unabhängige Wandlerpositionen nicht durch die über unterschiedliche Anregungssignale, statistisches Rauschen, zu ersetzen ist.

Die Größe der Standardabweichung ist von der Art der Mittelwertbildung abhängig. Wenn zunächst über die verschiedenen Positionen (räuml. Folge) gemittelt wird, beträgt die

Standardabweichung der Mittelwerte 1% (Spalte 4), wird dagegen über die zeitliche Folge gemittelt, so streuen diese Werte um ungefähr 2% (Spalte 5). Zum leichteren Vergleich ist in Spalte 6 das Verhältnis der Werte aus Spalte 2 und 4 und in Spalte 7 das der Werte aus 3 und 5 eingetragen. In Übereinstimmung mit Gleichung (12) ist das Verhältnis in Spalte 6 ungefähr 5, während die Werte aus 7 kleiner sind. Die Messungen an verschiedenen Positionen sind also unabhängig, während die Wiederholung der Messung an einer Position auch bei Anregung mit statistischem Rauschen offenbar redundant ist.

Um die obigen Ergebnisse zu überprüfen, wird für eine entsprechende Meßreihe als Anregung ein deterministisches Signal verwendet. Ein digitaler Rauschgenerator liefert eine exakt reproduzierbare pseudo-statistische Folge von Impulsen, die gefiltert als Anregungssignal dient. Wie auf dem Oszillographenschirm beobachtet werden kann, sind auch die Nachhallkurven bei dieser Art der Anregung selbst in kleinen Feinheiten reproduzierbar. Dieses Anregungssignal ist daher auch ein gutes Hilfsmittel, um die von der elektronischen Apparatur verursachte Streuung der Meßwerte zu bestimmen.

Tabelle 2 gibt analog zu Tabelle 1 die gemittelten Standardabweichungen aus zwei Meßreihen mit digitalem Rauschen als Anregung wieder. Die niedrigen Werte in Spalte 2 und 4 werden hauptsächlich von der Apparatur verursacht. Die Streuung für unterschiedliche Meßpunkte (räumliche Folge) in Spalte 3 ähnelt den entsprechenden Werten der Tabelle 1 und hängt kaum von vorheriger Mittelung über die zeitliche Folge ab (Spalte 5). Die Werte in Spalte 7 liegen deshalb auch nahe bei 1 und die der Spalte 6 sind nur wenig kleiner als die aus Spalte 3. Die Werte in Spalte 6 sind etwas kleiner als 5, was darauf hindeutet, daß das Schallfeld für zwei

um $\lambda/4$ voneinander entfernte Meßpositionen nicht völlig unkorreliert ist. Dies ist nach den theoretischen Überlegungen auch zu erwarten gewesen, denn danach sollten erst zwei $\lambda/2$ voneinander entfernte Meßpunkte unabhängige Messungen ergeben. Wenn der Tank mit statistischem Rauschen angeregt wird, wird bereits durch die Statistik des Anregungssignals die Korrelation so niedrig, daß sich in Spalte 6 der Tabelle 1 Werte um 5 ergeben.

Die Korrelation wird auch durch die Hydrophonaufhängung vermindert (ein Messingrohr von 10 mm Durchmesser und Länge je nach Eintauchtiefe bis zu 700 mm). Es wirkt als Streukörper, dessen Positionsänderungen neue Modenkonfigurationen ergeben. Dies kann deutlich an der Änderung der Feinstruktur der Nachhallkurven auf dem Oszillographenschirm bei Anregung mit digitalem Rauschen beobachtet werden.

Frequenz kHz	100 σ_T/T der ungemittelten Nachhallzeit T berechnet für die Folge in: Zeit	Raum	räuml. zeitl. gemittelten Zeit	Raum	Verhältnis von σ_T/T für ungemitt. T zu gemitt. T zeitl. (2 / 4)	räuml. (3 / 5)
1	2	3	4	5	6	7
6.37	5.2	5.7	1.0	2.3	5.2	2.5
12.73	5.1	5.6	1.0	2.2	5.1	2.6
25.46	3.6	3.8	0.8	1.7	4.7	2.6
50.92	4.6	4.8	0.9	1.6	5.2	3.1
101.86	4.7	4.8	0.9	1.6	5.3	3.3

Tabelle 1. Relative Standardabweichung in Proz. der Nachhallzeit T, auf unterschiedl. Wegen aus den experiment. Daten berechnet. Anregung: statistisches Rauschen.

1	2	3	4	5	6	7
6.37	1.7	4.8	0.4	4.3	4.0	1.1
12.73	2.3	5.4	0.7	4.8	3.4	1.1
25.46	1.7	4.5	0.4	4.1	4.3	1.1
50.92	1.5	4.3	0.3	3.9	4.4	1.1
101.86	1.6	4.1	0.5	3.6	3.4	1.2

Tabelle 2. Wie Tabelle 1. Anregung: deterministisches pseudo-statistisches Rauschen.

4 Absorptionsgradmessungen

Ein übliches Verfahren, den Schallabsorptionsgrad eines Objektes zu bestimmen, sind Untersuchungen in einem Hallraum. Aus der Nachhallzeit T_o des leeren Halltanks und der Nachhallzeit T des Tanks mit einer Probe läßt sich nach der Sabineschen Theorie der Absorptionsgrad α berechnen

$$\alpha \approx \frac{k\,V}{A_p}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right) \qquad (13)$$

(V ist das Wasservolumen, k=(24ln10)/c=0.0372 s/m eine Konstante, A_p die Fläche der Probe).

Um den Einfluß der Streuung der Nachhallzeit auf die Genauigkeit von Absorptionsgradmessungen im Experiment zu sehen, wird als Probe ein Breitband-Wasserschallabsorber geringer Schichtdicke mit einer Fläche von 340 mm x 340 mm untersucht /17/. Der Absorber hängt in einem schmalen Messingrahmen dicht unter der Wasseroberfläche. Seine Rückmasse schließt mit der Oberfläche ab. Dieser relativ kleine Absorber reduziert die Nachhallzeit um etwa ein Drittel.

Da der Absorptionsgrad aus der Differenz zweier Nachhallzeiten, bzw. der reziproken Werte, bestimmt wird, haben Streuungen der Nachhallzeit einen starken Einfluß auf die Genauigkeit der Absorptionsgradmessung. Mit den Standardabweichungen σ_o und σ_T der Nachhallzeitmessungen ergibt sich ein Fehler σ_α für den Absorptionsgrad

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T_o}\right)^2 \sigma_o^2} = \frac{k\,V}{A_p}\sqrt{\frac{\sigma_T^2}{T^4} + \frac{\sigma_o^2}{T_o^4}} \qquad (14)$$

und nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ein relativer Fehler

$$\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} = \frac{\sqrt{T_o^2\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + T^2\left(\frac{\sigma_o}{T_o}\right)^2}}{T_o - T} \quad . \qquad (15)$$

In Tabelle 3 sind die Werte der Standardabweichungen der Nachhallzeitmessungen und die sich daraus ergebenden Ungenauigkeiten bei der Absorptionsgradbestimmung aufgelistet. Der relative Fehler des Absorptionsgrades ist ungefähr 4-mal so groß wie der Fehler der Zeitmessungen.

Sehr deutlich zeigen die in Figur 6 dargestellten Meßergebnisse die Notwendigkeit, bei Absorptionsgradmessungen in Hallräumen über eine große Zahl von unabhängigen Einzelmessungen zu mitteln. Hier ist allerdings der nach der Eyringschen Theorie gemäß

$$\alpha_p = 1 - e^{-\frac{k\,V}{A\,T_o}} + \frac{A}{A_p}\left(e^{-\frac{k\,V}{A\,T_o}} - e^{-\frac{k\,V}{A\,T}}\right) \quad (16)$$

bestimmte aufgetragen, wobei A_p die Probenfläche und A die Halltankoberfläche ist. Die in Figur 6a wiedergegebenen Absorptionsgrade für den Breitbandabsorber werden durch 5 verschiedene einmalige Messungen der Nachhallzeiten T_o und T bestimmt, die in Figur 6b ergeben sich aus 5 Meßreihen, in denen über je 2 Messungen an 13 unabhängigen Empfängerpositionen gemittelt wird. Im zweiten Fall ist die Streuung deutlich kleiner, allerdings nur um den Faktor 2 anstelle des erwarteten $\sqrt{26}$=5.1. Es zeigt sich deutlich die Notwendigkeit, bei Absorptionsgradbestimmungen über noch mehr unabhängige Meßpunkte zu mitteln. Bei großen Wellenlängen begrenzt aber die Raumabmessung die Zahl der um $\lambda/2$ voneinander entfernt liegenden Punkte. Der Frequenzbereich des Hallraums und der, in dem der Absorber wirksam ist, sollten also aufeinander abgestimmt sein. Außerdem sollten nach Möglichkeit nicht so kleine Proben, wie die hier nur zur Verfügung stehende, untersucht werden. Zusätzlich verfälscht die Schallbeugung an den Kanten des Absorbers die Meßergebnisse, die sich in allgemeiner Form für einen Absorber

auf einer schallweichen Wand nicht behandeln läßt.

f (kHz)	4.5	18	72
T_o (ms)	390.0	806.4	883.6
σ_o (ms)	13.2	14.8	8.8
σ_o/T_o (%)	3.4	1.8	1.0
T (ms)	288.4	541.2	584.0
σ_T (ms)	11.2	11.2	7.6
σ_T/T (%)	3.8	2.1	1.3
σ_α/α (%)	17.7	7.3	4.3

Tabelle 3. Genauigkeit der Absorptionsgradbestimmung im Halltank (experimentelle Daten).

5 Schalleistungsmessungen

5.1 Schallquelle mit bekannter Leistung

Die von einem Objekt abgestrahlte Schalleistung P läßt sich in einem Hallraum durch Messung der stationären Energiedichte E_o des Schallfeldes im eingeschwungenen Zustand bestimmen /18/. Es gilt folgende Beziehung:

$$P = \frac{E_o \, \bar{\alpha} \, A \, c}{4} \qquad (17)$$

wobei $\bar{\alpha} A$ die Absorptionsfläche des Hallraums ist, die durch eine Nachhallzeitmessung bestimmt werden kann Gl.(13):

$$\bar{\alpha} A = \frac{24 \, V}{c \, T \log e} = 55.262 \, \frac{V}{c \, T} \qquad (18)$$

Die stationäre Energiedichte läßt sich wegen

$$E_o = \frac{\overline{p_{eff}^2}}{\rho \, c^2} \qquad (19)$$

durch Messung des Effektivwertes p_{eff} des Schalldrucks p ermitteln (ρ ist die Dichte des Mediums). Der Balken steht für räumliche Mittelung. Die Schalleistung P läßt sich also durch Messung der Größen Schalldruck p und Nachhallzeit T bestimmen:

$$P = 13.82 \, \frac{\overline{p_{eff}^2} \, V}{\rho c^2 \, T} \quad . \qquad (20)$$

Um Erfahrungen über dieses Meßverfahren im Halltank zu sammeln, wird die Schalleistung bestimmt, die ein reversibler Wandler (Brüel + Kjaer Hydrophon 8100) abstrahlt. Aus dem gemessenen Effektivwert der angelegten Spannung und den Eichdaten kann man die Schalleistung berechnen, die das

Hydrophon im Freifeld abstrahlt. Diese Untersuchungen werden im Frequenzbereich von 4.5 kHz bis 50 kHz durchgeführt, da das Hydrophon 8100 oberhalb von 50 kHz eine Resonanz hat. In dem untersuchten Frequenzbereich ist seine Richtcharakteristik kugelförmig. Es befindet sich an der üblichen Sendewandlerposition (300 mm von einer Ecke des Tanks entfernt). Als Signal werden Terzbandrauschen, Schmalstbandrauschen (Bandbreite etwa halb so groß wie bei der Terz) und ein reiner Sinuston entsprechend der Mittenfrequenz der Rauschsignale verwendet und zwar für 8 verschiedene Frequenzen bzw. Bänder. Bei der Messung mit Bandsignalen wird die bei Anregung mit konstanter Spannung mit der Frequenz ansteigende Sendeempfindlichkeit (12 dB/Oktave) durch eine entsprechende Flanke eines Tiefpaßfilters kompensiert.

An 36 Positionen, die $\lambda/2$ voneinander entfernt sind, also unabhängige Messungen ermöglichen, wird der Schalldruck mit einem Eichhydrophon LC 5 bestimmt. Die Ausgangsspannung wird nach bekannter Verstärkung mit einem Meßverstärker (Brüel + Kjaer Typ 2608) gemessen.

Alle Meßpositionen sind weiter als eine halbe Wellenlänge von den Wänden entfernt, um bei ausreichender Interferenz der Tankmoden zu messen. Damit der Direktschall weniger als ein Drittel des reflektierten ausmacht, ist der Abstand r zum Sender immer weit größer als in /11/ verlangt wird:

$$r > \frac{1}{4}\sqrt{\frac{Q\,\bar{\alpha}\,A}{1-\bar{\alpha}}} \approx \sqrt{0.0025\,\frac{Q\,V}{T}} \quad , \qquad (21)$$

wenn man für kleine Werte von $\bar{\alpha}$ den Nenner gleich eins setzt und die Absorptionsfläche $\bar{\alpha}\,A$ gemäß Gleichung (13) ersetzt. Q ist der Richtungsfaktor des Empfängers, für einen Empfänger mit Kugelcharakteristik wie das LC 5 gleich 1.

In Figur 7 ist für die Anregung mit einem reinen Sinus für 8 verschiedene Frequenzen das Verhältnis ΔP der gemessenen

Schalleistung P_g zu der theoretischen P_{th} für 36 verschiedene Empfängerpositionen dargestellt. Die theoretische Schallleistung ergibt sich bei der gemessenen Anregungsspannung aus den Daten des Hydrophons 8100 und gilt für das Freifeld. Auf der Abszisse ist die Entfernung des Meßpunktes von einem willkürlichen Nullpunkt im Verhältnis zur Wellenlänge aufgetragen. Man sieht an den starken Schwankungen deutlich, daß die Messungen an voneinander unabhängigen Orten erfolgte. Am Rand ist der Mittelwert der 36 Einzelmessungen aufgetragen. Die Standardabweichung des Schalldruckpegels σ_L liegt zwischen 4.7 dB und 6.3 dB. Der Mittelwert über die 8 Frequenzen ist σ_L=5.45 dB in guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert σ_L=5.57 dB, nach /14/.

Auch für die Messung mit Terzbandrauschen oder Schmalstbandrauschen stimmt, so weit noch meßbar, die Standardabweichung des Schalldruckpegels mit dem von der Theorie verlangten überein. Für die Standardabweichung σ_L gilt nach /14/

$$\sigma_L = \frac{5.57}{\sqrt{1 + 0.238\ T\ B}}\ \text{dB} \quad . \qquad (7)$$

Für die Terz um 4.5 kHz ergibt sich in guter Übereinstimmung 0.6 dB. Bei höheren Frequenzen ist die Streuung nicht mehr meßbar, der Schalldruckpegel ist praktisch ortsunabhängig.

Auffällig ist aber die Diskrepanz zwischen den Abweichungen der gemessenen Werte für die Schalleistung vom theoretischen Wert und der gefundenen und verlangten kleinen Standardabweichung, zumal wenn bei der Anregung mit einem Sinus über 36 Positionen und bei Anregung mit Rauschen über 20 Positionen gemittelt wird. Für den Sinus sollten sich auch nur Abweichungen von 1 dB ergeben, für die Bandsignale noch viel kleinere. In Tabelle 4 sind die Werte für das Verhältnis

gemessener zu theoretischer oder besser zu der im Freifeld abgestrahlten Schalleistung für Anregung mit Terzbandrauschen, Schmalstbandrauschen und Sinuston zusammengestellt.

In einer Simulation auf einem Computer /19/ für die von einem Monopol abgestrahlte Schalleistung treten neben starken Schwankungen des Schalldruckpegels, die hier experimentell beobachtet worden sind, Differenzen von -2 dB bis -3 dB zu der im Freifeld abgestrahlten Schalleistung auf.

Um das Schalleistungsmeßverfahren zu verbessern, sollten im unteren Frequenzbereich die Hallräume stärker bedämpft werden /19,20/. Für den mittleren und oberen Frequenzbereich wird die Anwendung großer rotierender Flächen und zeitliche Mittelung empfohlen /20,21/. Eine räumliche Mittelung über viele unabhängige Meßpunkte dürfte aber gleichwertig sein.

f (kHz)	ΔP (dB)	ΔP (dB)	ΔP (dB)
4.50	- 2.5	0.5	- 5.1
6.37	- 1.6	0.6	- 0.9
9.00	- 2.4	0.5	1.0
12.73	- 2.7	0.6	1.2
18.00	- 4.9	- 0,2	- 0.1
25.46	- 4.8	0.1	- 5.6
36.00	- 5.5	1.5	- 2.5
50.92	- 3.7	2.9	- 1.7
Anregung:	Terz	Schmalst.	Sinus

Tabelle 4. Verhätnis ΔP der gem. P_g zur Freifeldschalleistung P_{th} für verschiedene Arten der Anregung

$$\Delta P = 10 \log \frac{P_g}{P_{th}}$$

5.2 Schallabstrahlung einer ebenen Stahlplatte

Das Hallraumverfahren zur Bestimmung der abgestrahlten Schalleistung ist besonders interessant für die Untersuchung von Objekten mit einer ausgeprägten Richtcharakeristik. Die Leistung wird durch Messung der stationären Energiedichte bestimmt, die bei ausreichender Interferenz vieler angeregter Raummoden und ausreichendem Abstand zwischen Empfänger und abstrahlendem Objekt (siehe Gl. (21) nach /11/) nicht von der Richtcharakteristik abhängt. Der Hallraum integriert bei einer Schallquelle über alle Raumwinkel wie eine Ulbrichtsche Kugel bei einer Lichtquelle.

Als Objekt mit ausgeprägter Richtcharakteristik wird im Halltank eine schwingende Stahlplatte untersucht. Die Wasserschallabstrahlung dieser Platte ist in /9/ beschrieben. Bei der Untersuchung schwingender Platten oder ähnlicher Objekte interessiert nicht so sehr die absolute abgestrahlte Leistung sondern der Abstrahlgrad s /22/, d. h. die abgestrahlte Leistung des untersuchten Objekts wird mit der verglichen, die eine gleichgroße Fläche eines mit gleicher effektiven Schnelle v_{eff} schwingender Kolbenstrahler abstrahlen würde:

$$s = \frac{P}{\rho\, c\, S\, \bar{v}^2_{eff}} \qquad (22)$$

(wobei ρc der Wellenwiderstand des umgebenen Mediums, S die abstrahlende Fläche und $\bar{v}_{eff}$ die Effektivschnelle der strahlenden Fläche ist). Nach Gleichung (20) und (22) läßt sich im Hallraum der Abstrahlgrad s durch eine Leistungsmessung, also wie oben ausgeführt durch Messung der Energiedichte bzw. des räumlich gemittelten Quadrats des effektiven Schalldrucks $\overline{p^2_{eff}}$ und der Nachhallzeit T bestimmen:

$$s = \frac{13.82 \, \overline{p_{eff}^2} \, V}{\rho^2 \, c^3 \, T \, S \, \bar{v}_{eff}^2} \qquad (23)$$

Hier wird nur die Stahlplatte ohne Rippen untersucht. Sie hat die Maße 360 mm x 120 mm x 20 mm und wird bei der Randbedingung allseitig freier Kanten von einer Punktkraft in der Mitte zu Schwingungen erregt. Ein Bariumtitanatröhrchen (10 mm Durchmesser, 25 mm Länge), das sich gegen eine Gegenmasse aus Blei abstützt, regt die Platte an. Die näheren Einzelheiten sind ausführlich in einer früheren Untersuchung beschrieben /9/.

Ein Problem stellt die einfache Bestimmung der mittleren effektiven Schnelle der schwingenden Platte dar. Nach /9/ ist aber die Schnelle in einer Ecke näherungsweise der effektiven Schnelle proportional und zwar ist sie wegen der exponentiellen Überhöhung am Rand um den Faktor $\sqrt{2}$ größer. Zur Schnellemessung wird deshalb in der rechten unteren Ecke der Platte ein kleiner, leichter Beschleunigungsaufnehmer (Brüel + Kjaer 4344) angeschraubt, der die Schwingungen der Platte nicht beeinflußt. Durch Integration seines Signals erhält man ein der effektiven Schnelle proportionales Signal.

Die Platte wird mit konstanter Kraft angeregt. Dazu wird zwischen Platte und Anregungssystem ein Kraftmeßkopf (Brüel Kjaer 8200) geschaltet, dessen Signal die Anregungsspannung regelt. Damit die Platte weiterhin punktförmig und nicht über die relativ große Auflagefläche des Meßkopfes angeregt wird, befindet sich zwischen Kraftmeßkopf und Platte noch ein dünner Ring. In Figur 8 ist der Schnellefrequenzgang der Platte im Halltank wiedergegeben. Da die Anregungskraft konstant ist, entspricht er dem Frequenzgang der Admittanz. Man kann in Figur 8 deutlich die starke Rückwirkung des Schallfeldes auf die Platte an den tiefen Einbrüchen (-35 dB)

sehen, die sich dem Frequenzgang der Platte überlagern. Diese Rückwirkung der interferierenden Raummoden ist stark ortsabhängig, deshalb ist die Lage der Einbrüche von der Position der Platte im Tank abhängig. Deutlich zu erkennen ist auch, daß die Anzahldichte der angeregten Tankmoden mit der Frequenz zunimmt (vergleiche (3)). Unterhalb von 5 kHz wird die Plattenresonanz nicht vom Schallfeld gestört, darüber liegen die Tankmoden bereits so dicht, daß sie die Platte merklich beeinflussen und oberhalb von 12 kHz stören sie so stark, daß Plattenresonanzen kaum noch zu erkennen sind.

Der Abstrahlgrad s der Stahlplatte wird im Halltank für Anregung mit Terzbandrauschen und in den Plattenresonanzen bei Anregung mit einem Sinuston bestimmt. In Figur 9a ist der Abstrahlgrad s in den Resonanzen dargestellt, in Figur 9b für die Anregung mit Terzrauschen. Zum Vergleich sind eine Näherung für die Platte mit Schwingungsbauch an den Kanten der größeren Linearabmessung der Platte nach /22/ und als offene Kreise die Meßwerte aus /9/ mit eingezeichnet, die durch Messung der Halbwertsbreite der Resonanzen bzw. oberhalb der Grenzfrequenz f_{gr} durch Messung des Einschwingverhaltens der Platte erhalten worden sind. Bei der Grenzfrequenz (18 kHz) ist die Biegewellenlänge der Platte gleich der Schallwellenlänge des umgebenden Mediums. Oberhalb der Grenzfrequenz wird der Abstrahlgrad frequenzunabhängig, die Plattenresonanzen werden stark verbreitert und überlappen sich, wie es auch am Frequenzgang in Figur 8 zu sehen ist.

Um den Abstrahlgrad s für die Plattenresonanzen zu bestimmen, wird in den Resonanzen des Frequenzgangs gemessen, d.h. in den Spitzen, die sich durch die Wechselwirkung mit dem Hallfeld ergeben. Für jede Plattenmode werden also mehrere Messungen bei nur geringfügig veränderter Frequenz

gemacht, für die die Mittelwerte von 20 an unabhängigen Empfängerpositionen durchgeführten Einzelmessungen des Schalldrucks verwendet werden. Die Standardabweichung des Schalldruckpegels an diesen 20 Punkten stimmt wieder gut mit den geforderten 5.57 dB überein. Die verschiedenen Werte für eine Plattenresonanz weichen aber stark voneinander ab. Bei Messungen in den Resonanzen der Platte ist es wahrscheinlich sinnvoller, über den Bereich der Resonanzkuppe zu mitteln.

In Figur 9b sind die Ergebnisse für die Messung mit Terzbandanregung aus 5 verschiedenen Meßreihen dargestellt. Bei den Mittelwerten (Δ) ist die Bandbreite der Terz durch horizontale Balken angegeben. Die Abweichungen von Meßreihe zu Meßreihe sind viel größer als bei den geringen Schwankungen innerhalb einer Meßreihe zu erwarten wäre, die wieder den erwarteten Werten (7) entsprechen. Die Ursache für diese Diskrepanzen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Auffällig ist auch, daß für die unteren Terzen der Wert über der Näherung nach /22/ liegt, was für die Terz um 6.4 kHz durch die Mode mit Schwingungsbauch in der kurzen Ausdehnungsrichtung der Platte erklärlich ist /9/, während bei höheren Frequenzen der gemessene Wert zu niedrig liegt, insbesondere für die Terz um 18 kHz.

In Anbetracht der Tatsache, daß auch bei Luftschalluntersuchungen die gemessenen Abstrahlgrade nicht sehr gut mit theoretischen Näherungen übereinstimmen, muß man die in Figur 9 dargestellten Ergebnisse dennoch als zufriedenstellend ansehen.

6 Schluß

Bei Messungen in einem Halltank muß sorgsam auf die statistischen Eigenschaften des Schallfeldes geachtet werden. Zur Bestimmung der Nachhallzeit genügt es auch bei Anregung mit breitbandigen stochastischen Signalen nicht, über viele wiederholte Messungen zu mitteln, sondern es muß zusätzlich über verschiedene voneinander unabhängige Wandleranordnungen gemittelt werden. Gleichwertig zu Positionsveränderungen der Wandler sind geringfügige Volumenänderungen. Eine genaue Nachhallzeitmessung ist für die Absorptionsgradbestimmung einer Probe unbedingt notwendig. Auch bei der Bestimmung der von einem Objekt abgestrahlten akustischen Gesamtleistung muß über viele unabhängige Meßpositionen gemittelt werden, insbesondere bei monochromatischer oder schmalbandiger Anregung.

Herrn Prof. Dr. M. R. Schroeder bin ich für die Anregung dieser Arbeit und sein stets förderndes Interesse zu Dank verpflichtet.

Herrn Dr. D. Guicking danke ich für zahlreiche Diskussionen und nützliche Hinweise.

Allen Angehörigen des III.Physikalischen Instituts der Universität Göttingen danke ich für ihre Hilfe und Unterstützung.

Die Untersuchung wurde im Rahmen eines Forschungsvertrages mit dem Department of Physical Research (Naval), M.O.D., London, durchgeführt.

Die numerischen Rechnungen wurden auf einer Rechenanlage Honeywell H 632 durchgeführt, die dem III.Physikalischen Institut von der Stiftung Volkswagenwerk zur Verfügung gestellt wurde.

Literatur

1 Breed, W.L., Donelly, J.D., Kinsler, L.B.
Investigation and Application of Reverberation Measurements of Acoustic Power in Water
J. Acoust. Soc. Amer. 35 (1963) , 1621 - 1625

2 Lubman, D.
Reverberation Measurements of Narrow-band Noise in a Water Tank
J. Acoust. Soc. Amer. 37 (1965) , 1209 (A)

3 Watters, B.C.
A Reverberant Water Tank for Underwater Measurements
J. Acoust. Soc. Amer. 53 (1972) , 357 (A)

4 Blake, W., Maga, L.
Chamber for Reverberant Power Measurements in Air and in Water
J. Acoust. Soc. Amer. 57 (1975) , 380 - 384

5 Meyer, E.
Sound Absorption and Sound Absorbers in Water
Bureau of Ships, Washington DC, Nav. Ships 900164, 1950

6 Kurtze, G., Tamm, K.
Measurements of Sound Absorption in Water and in Aqueous Solutions of Electrolytes
Acustica 3 (1953) , 33 - 48

7 Guicking, D., Warhonowicz, T., Buddruss, C.
Schallabstrahlung von ebenen, zu Biegeschwingungen angeregter Platten in Wasser
Acustica 23 (1970) , 131 - 141

8 Guicking, D., Wetterling, T.
Verbesserte schallweiche Auskleidung eines Halltanks
Acustica 30 (1974) , 287 - 289

9 Teubner, V.
Wasserschallabstrahlung von Platten mit und ohne Versteifung
Acustica 31 (1974) , 203 - 215

10 Schroeder, M.R.
New Method of Measuring Reverberation Time
J. Acoust. Soc. Amer. 37 (1965) , 409 - 413

11 Schroeder, M.R.
Frequency Autocorrelation Functions of Frequency Responses in Rooms
J. Acoust. Soc. Amer. 34 (1962) , 1819 - 1823

12 Dah-You Maa
Fluctuation Phenomena in Room Acoustics
J. Acoust. Soc. Amer. 18 (1946) , 134 - 139

13 Schroeder, M.R.
Eigenfrequenzstatistik und Anregungsstatistik in Räumen
Acustica 4 (1954) , 456 - 468

14 Schroeder, M.R.
Effect of Frequency and Space Averaging on the Transmission Responses of Multimode Media
J. Acoust. Soc. Amer. 46 (1969) , 277 - 283

15 Lubman, D.
Spatial Averaging in a Diffuse Sound Field
J. Acoust. Soc. Amer. 46 (1969) , 532 - 534

16 Schroeder, M.R.
Die statistischen Parameter der Frequenzkurven in großen Räumen
Acustica 4 (1954) , 594 - 600

17 Ahlswede, T.
Breitband-Wasserschallabsorber geringer Schichtdicke
Dissertation, Göttingen 1974

18 Meyer, E., Just, P.
Messung der Gesamtenergie von Schallquellen
Z. techn. Physik 10 (1929) , 203 - 215

19 Maling, G.C.
Calculation of the Acoustic Power Radiated by a Monopole in a Reverberation Chamber
J. Acoust. Soc. Amer. 42 (1967) , 859 - 865

20 Tichy, J.
Mündliche Mitteilung auf dem Schalleistungskolloquium Eighth International Congress on Acoustics, London 1974

21 Tichy, J., Baade, P.K.
Effect of rotating diffusers and sampling techniques on sound-pressure averaging in reverberation rooms
J. Acoust. Soc. Amer. 56 (1974) , 137 - 143

22 Gösele, W.
Schallabstrahlung von Platten, die zu Biegeschwingungen angeregt sind
Acustica 3 (1953) , 243 - 248

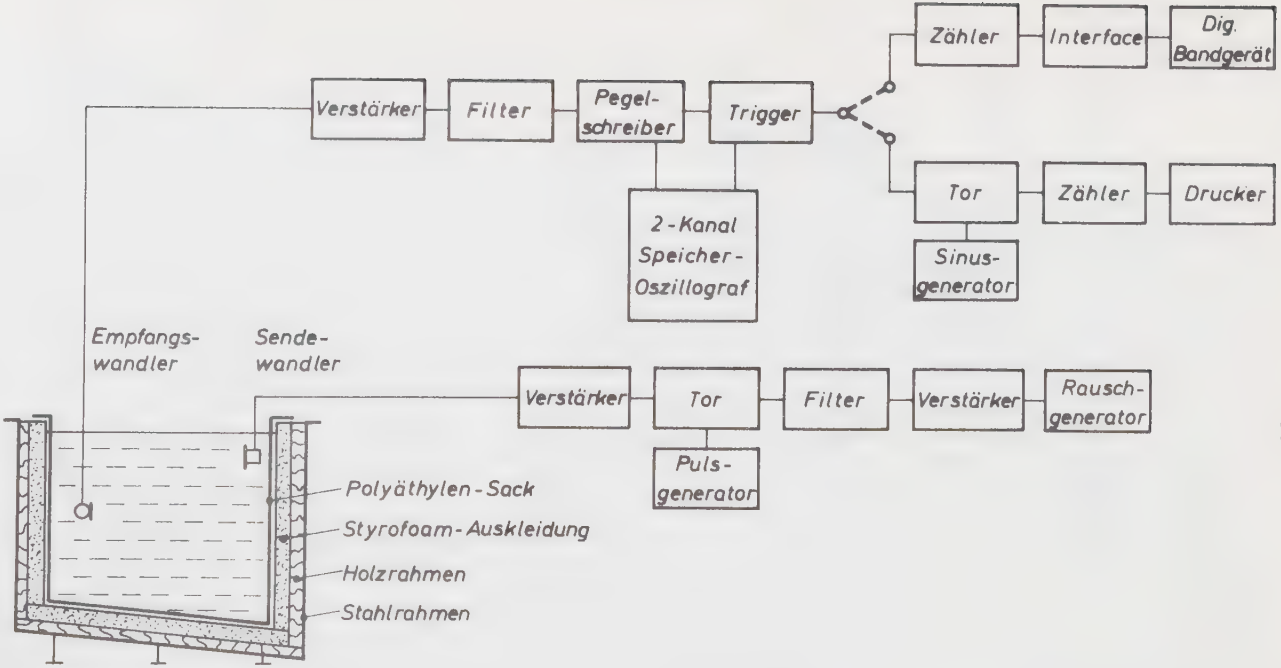

Fig. 1 Schematische Darstellung der Meßanordnung zur Bestimmung der Nachhallzeit des schallweich begrenzten Halltanks
mittlere Tankabmessungen: 1.60 m x 1.43 m x 1.03 m
Wasservolumen: 2.4 m^3 Begrenzungsfläche: 11 m^2

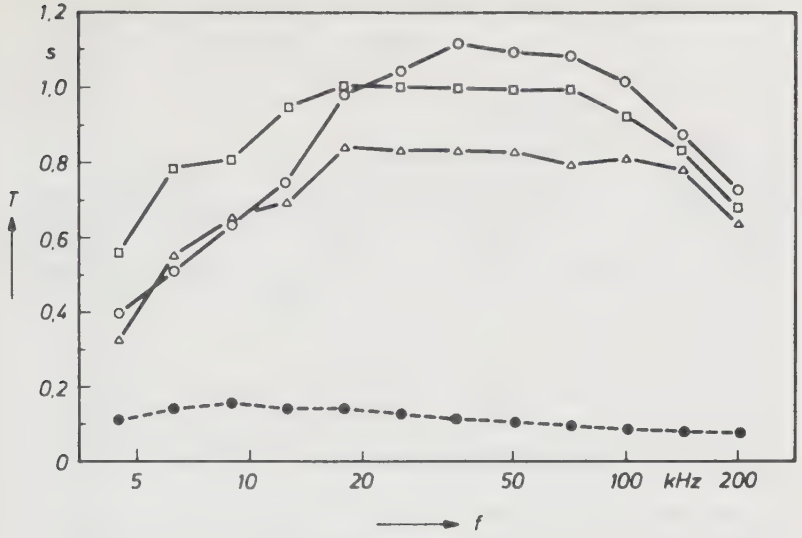

Fig. 2 Nachhallzeit T des schallweich begrenzten Halltanks

- 0.15 mm Folie, entgastes Wasser
- 0.15 mm Folie, nicht entgastes Wasser
- 0.10 mm Folie, nicht entgastes Wasser
- Aufbau nach /7/

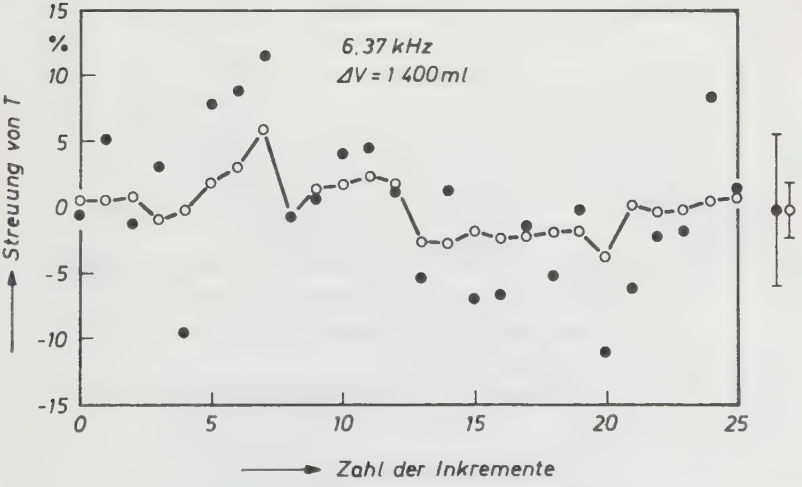

Fig. 3 Relative Standardabweichung bei Nachhallzeitmessungen wie Fig. 4 , Änderung des Wasservolumens

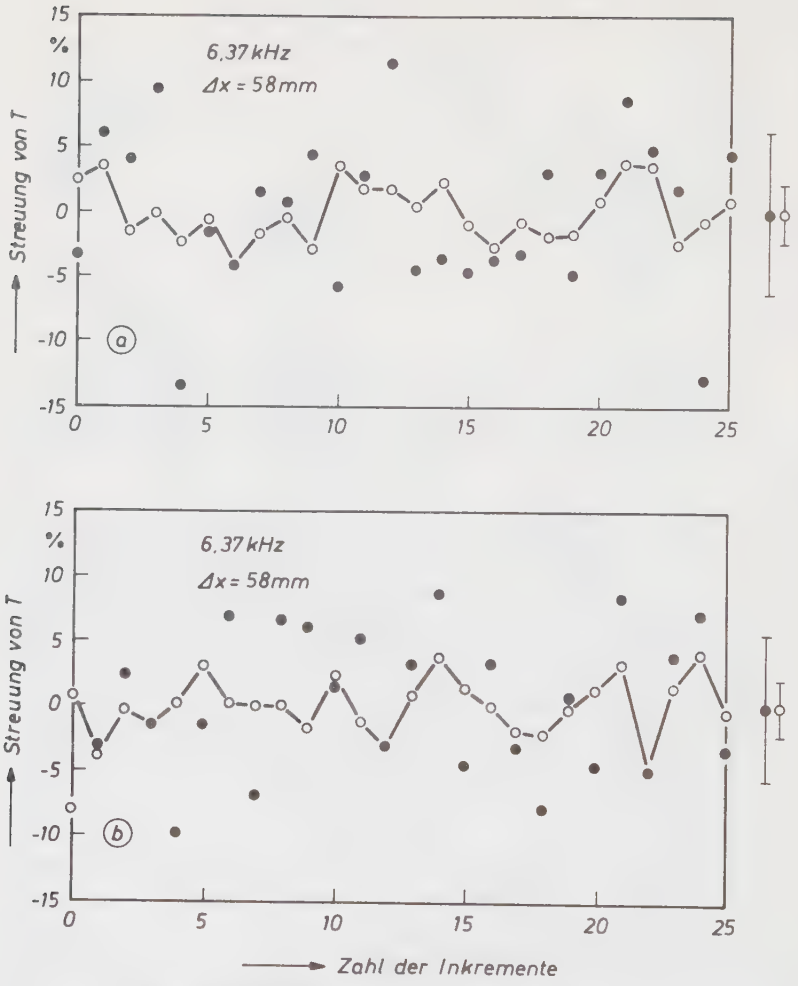

Fig. 4 Relative Standardabweichung bei Nachhallzeitmessungen
a) Änderung der Empfängerpositionen
b) Änderung der Sendewandlerpositionen
● Einzelmessungen
o Mittelwert von 25 Einzelmessungen

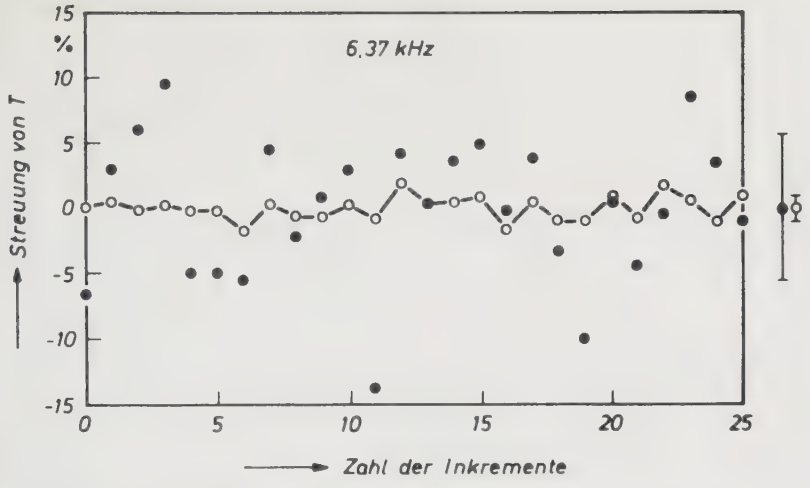

Fig. 5 analog Fig. 3 und 4 , ohne Parameteränderung

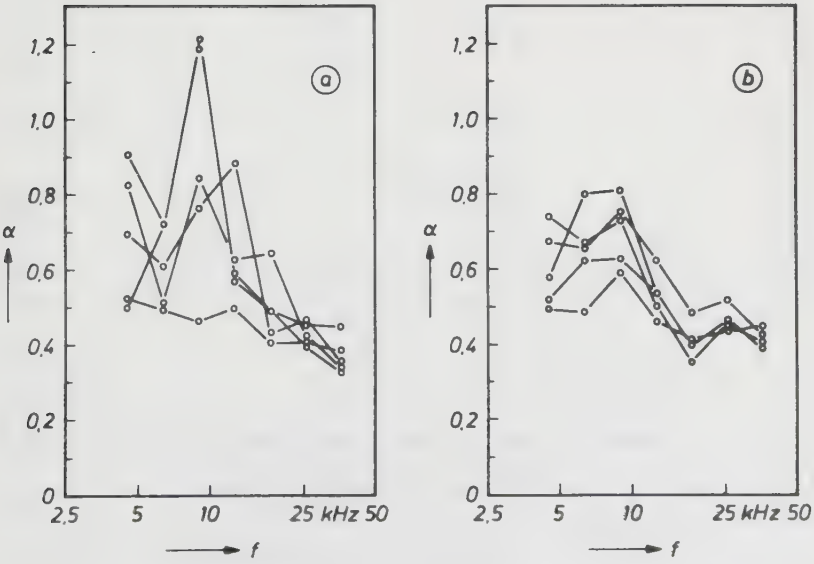

Fig. 6 Absorptionsgrad α eines Absorbers /17/
a) Einzelmessungen b) Mittelung über 13 Positionen

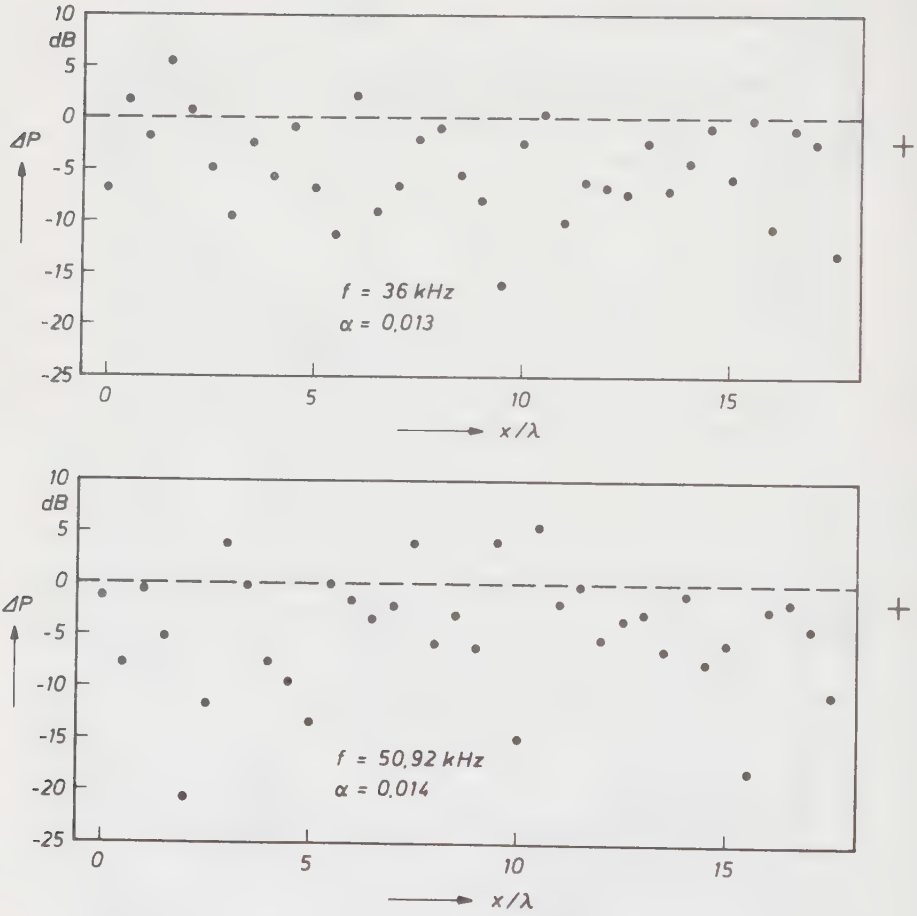

Fig. 7 Verhältnis ΔP der gemessenen P_g zu der theoretischen Schalleistung P_{th} des Hydrophons Brüel+Kjaer 8100 für verschiedene Empfängerpositionen

Anregung: Sinuston

\+ Mittelwert über 36 Positionen

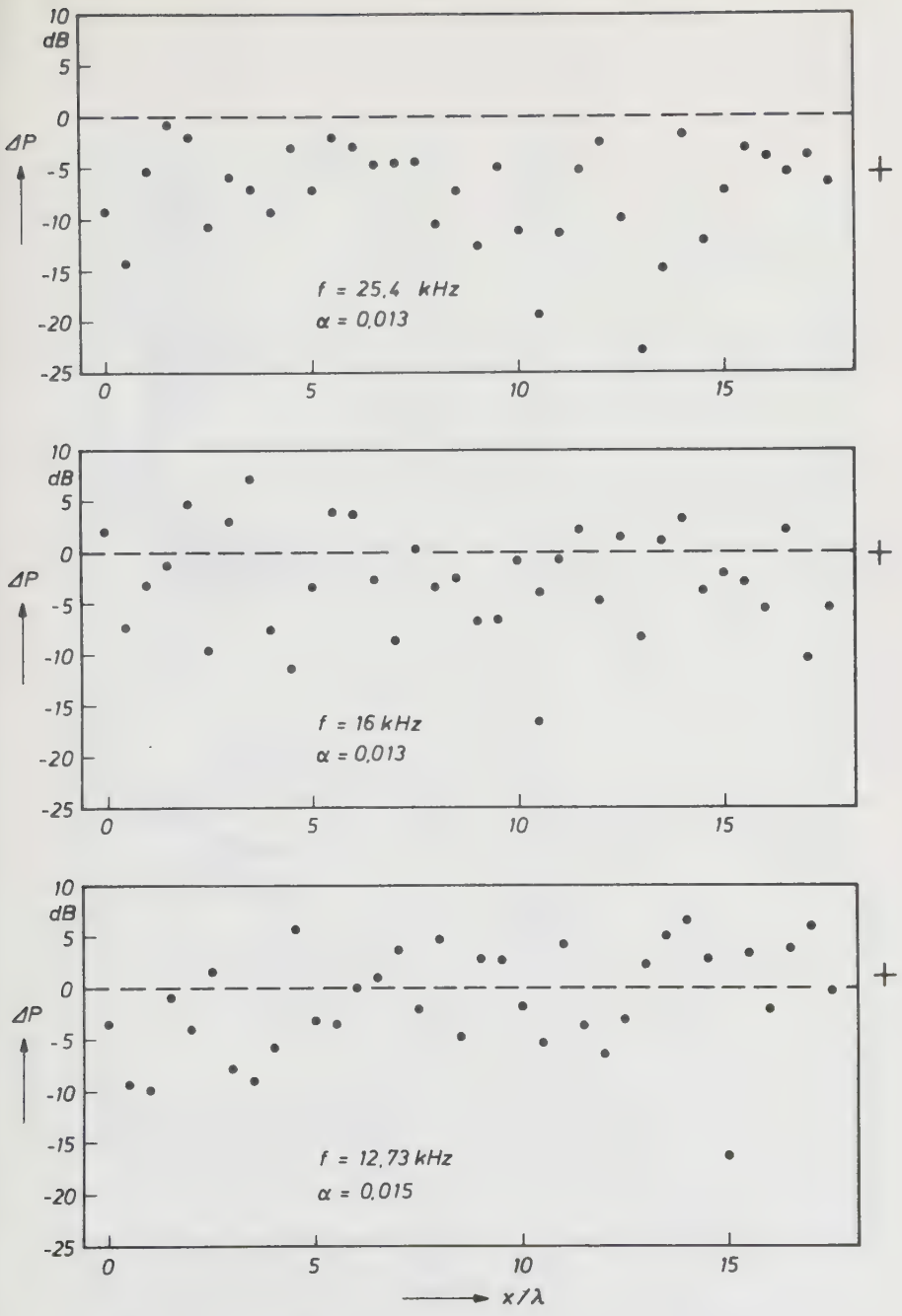

Fig. 7 wie oben

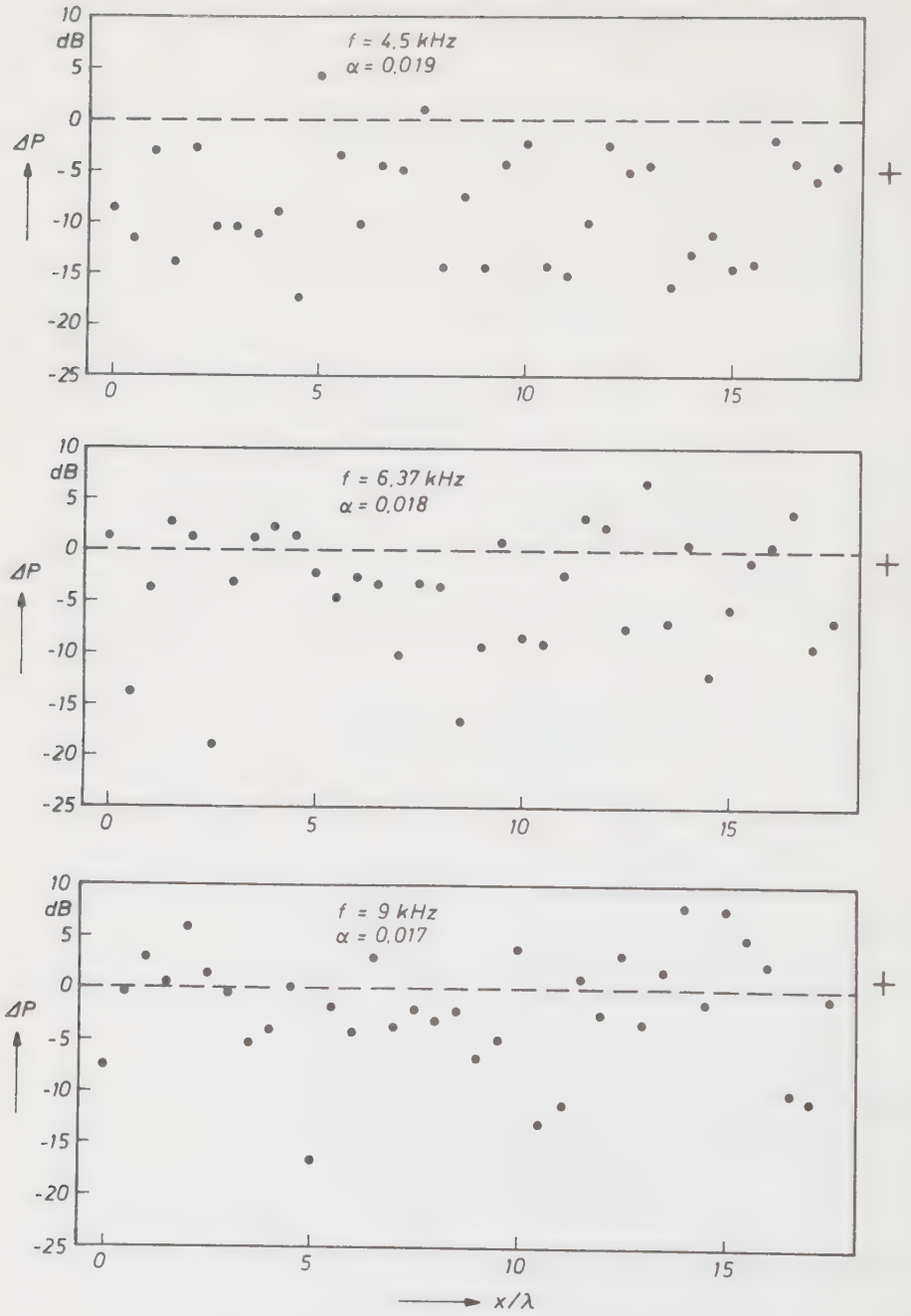

Fig. 7 wie oben

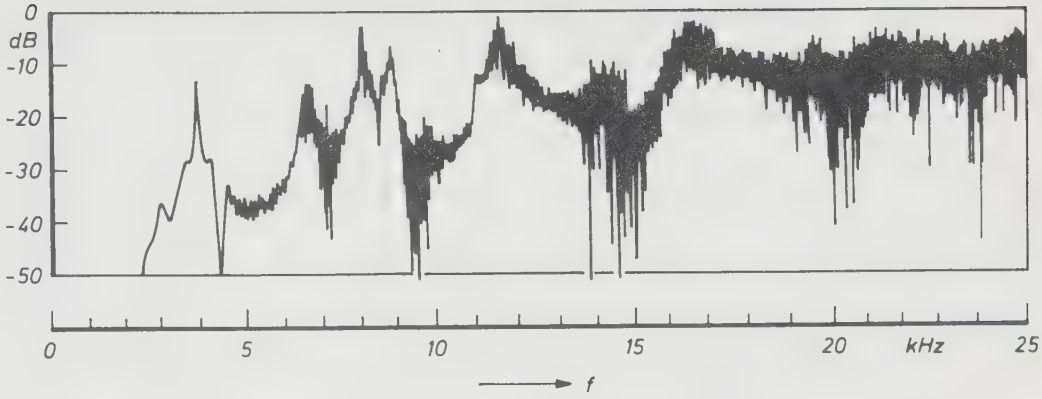

Fig. 8 Admittanzfrequenzgang einer ebenen Stahlplatte (360x120x20 mm) im Halltank

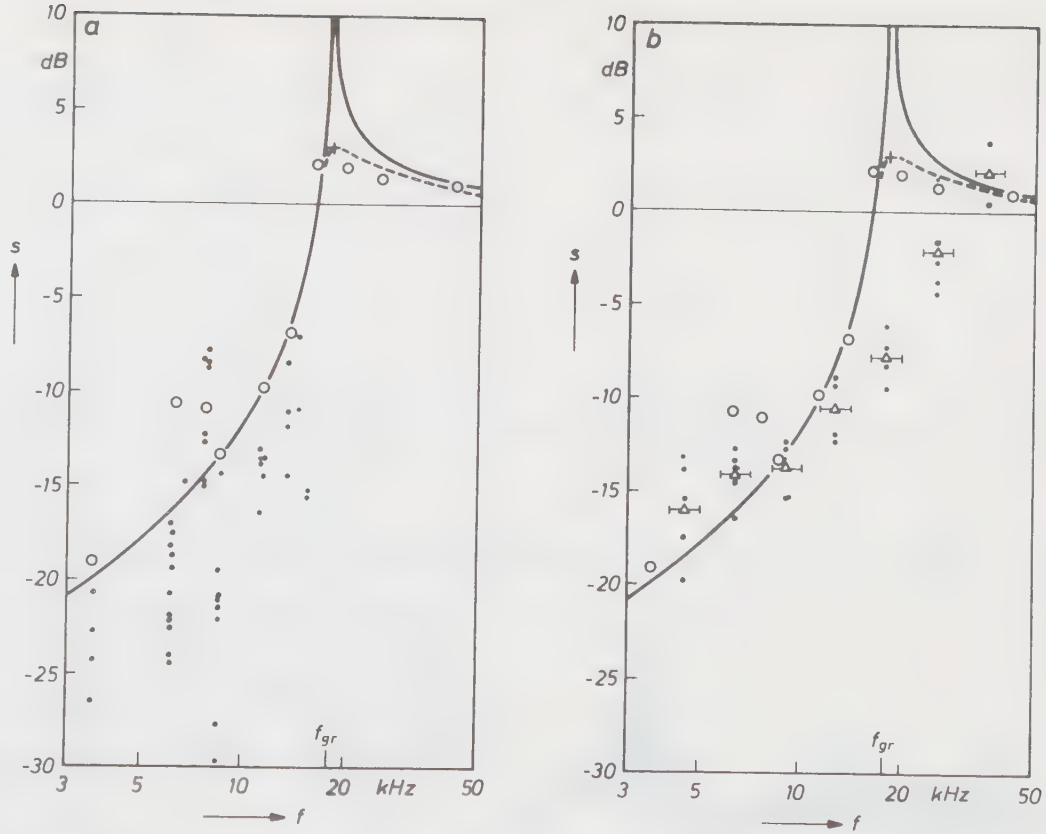

Fig. 9 Abstrahlgrad s der Stahlplatte. a) Resonanz b) Terzbandrauschen
▵ Mittelwert, ○ Messungen nach /9/, — ---+ Näherungen nach /22/

Lebenslauf

Am 22. August 1944 wurde ich in Freiburg im Breisgau geboren. Meine Eltern sind Prof. Horst Wetterling und seine Ehefrau Dipl.Chem. Marlene Wetterling, geb. Sbach. Am 16. Februar 1965 absolvierte ich am mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig des Ernst-Moritz-Arndt-Gymnasiums in Osnabrück die Reifeprüfung. Den Grundwehrdienst leistete ich in der Zeit vom 1. April 1965 bis zum 30. September 1966 ab. Im Wintersemester 1966 begann ich an der Universität Münster das Studium der Physik und legte dort am 18. November 1968 die Diplom-Physiker-Vorprüfung ab. Im Sommersemester 1969 setzte ich mein Studium an der Universität Göttingen fort. Mit der Diplomarbeit " Ein neuer Wasserschall-Hallraum mit schallweicher Begrenzung ", die im III.Physikalischen Institut der Universität Göttingen unter Prof. Dr. Dr.e.h. Erwin Meyer und Prof. Dr. Manfred R. Schroeder angefertigt wurde, legte ich am 2. Mai 1972 die Diplomprüfung für Physiker ab. Anschließend war ich im gleichen Institut mit weiterführenden Untersuchungen auf dem Gebiet des Wasserschalls beschäftigt, aus denen die vorliegende Arbeit entstanden ist.